



L'Himalaya, un laboratoire à ciel ouvert pour géomorphologues

Monique Fort

► To cite this version:

Monique Fort. L'Himalaya, un laboratoire à ciel ouvert pour géomorphologues. Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, 2013, 59, p. 355-373. hal-01267511

HAL Id: hal-01267511

<https://hal.science/hal-01267511>

Submitted on 4 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'Himalaya, un laboratoire à ciel ouvert pour géomorphologues*

par

Monique FORT**

MOTS-CLES. — Himalaya; Collision intracontinentale; Risques naturels; Changement climatique.

RESUME. — L'Himalaya, chaîne de montagnes la plus haute de la Terre, est le résultat de la collision toujours active des plaques Inde et Asie. Les fronts de chevauchement, de plus en plus élevés vers le nord, alternent avec des bassins intramontagnards. Les taux élevés de surrection de la chaîne, l'activité sismique ainsi que les précipitations extrêmes de la mousson sont autant de facteurs qui provoquent l'incision des rivières et le déclenchement de glissements de terrain, principale source de sédiments et cause potentielle de blocages et d'inondations catastrophiques dans les vallées. Au cours des dernières décennies, croissance démographique et développement des infrastructures ont accru l'impact des risques naturels. De plus, l'évolution récente du climat et le recul des glaciers du Haut-Himalaya pourraient indirectement menacer les ressources en eau de l'ensemble de la chaîne et de son piémont.

TREFWOORDEN. — Himalaya; Intracontinentale botsing; Natuurlijke risico's; Klimaatverandering.

SAMENVATTING. — *De Himalaya, een openluchtlaboratorium voor geomorfologen.* — De Himalaya, het hoogste reliëf op Aarde, is het resultaat van de botsing tussen Indië en Azië, twee continentale tektonische platen die nog steeds actief bewegen. Overschuivingsfronten vormen bergketens die afwisselen met intramontane bekkens. De rivieren snijden zich sterk in ten gevolge van verschillende factoren: de hoge snelheid waarmee de bergketens opgeheven worden, de hoge seismische activiteit en de extreme neerslagdebieten van de moesson. Aardverschuivingen, het resultaat van deze sterke rivierinsnijding, zijn de voornaamste sedimentbron; ze kunnen de dalbodems afdammen en zo catastrofale overstromingen veroorzaken. De explosieve bevolkingsgroei en de infrastructurele ontwikkeling van de laatste decennia hebben de impact van natuurlijke risico's sterk verhoogd. Daarenboven kan de recente klimaatverandering en het terugtrekken van de gletsjers in de Hoge Himalaya indirect de beschikbaarheid van water in de gehele bergketen en het heuvelland aan de voet ervan bedreigen.

KEYWORDS. — Himalaya; Intracontinental Collision; Natural Hazards; Climatic Change.

SUMMARY. — *The Himalayas: An Outdoor Laboratory for Geomorphologists.* — The Himalayas, the highest relief on Earth, is a product of the ongoing collision between

* Communication présentée à la séance commune des trois Classes tenue le 7 juin 2011. Décision de publication prise le 27 mars 2012. Texte définitif reçu le 3 mai 2012.

** Prof. Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, UMR 8586 PRODIG, C.P. 7001 (GHSS), bât. ODG, rue A. Einstein, F-75205 Paris Cedex 13 (France).

India and Asia. Thrust ridges, higher and higher when going northward, alternate with intramontane basins. High uplift rates, seismic activity and extreme monsoon rainfall are so many factors causing river incision and landsliding, a major source of sediment and the potential cause of valley blockage and catastrophic flooding. Over the last decades, population growth and infrastructure development have increased the impact of natural hazards. Moreover, recent trends in climate could indirectly threaten glaciation in the Greater Himalaya, and possibly water resources throughout the whole range and its piedmont.

Introduction

L'Himalaya constitue les plus hauts reliefs de la Terre. L'ampleur des dénivellations, l'étagement des milieux bioclimatiques, la magnitude et la rapidité des processus naturels en œuvre, font de cette chaîne de montagnes un laboratoire à ciel ouvert exceptionnel, qui permet de comprendre le fonctionnement des autres systèmes montagneux. Montagne tropicale, l'Himalaya accueille de fortes densités de population. Au cours des dernières décennies, l'urbanisation et le développement des infrastructures liés à la croissance démographique ont accru la vulnérabilité aux risques naturels, tandis que l'évolution récente du climat et, dans une moindre mesure, le recul des glaciers pourraient indirectement menacer l'accès des populations à la ressource en eau.

Notre propos est d'insister d'abord sur l'apport de l'Himalaya à la connaissance de la géomorphologie d'une chaîne de montagnes, en particulier sur les mécanismes de formation des reliefs, liés à la collision des plaques Inde et Asie. Nous évoquerons ensuite, dans un contexte bioclimatique dominé par la mousson, les interactions entre forces internes et externes sur le développement de risques naturels, tels que les glissements de terrain, les inondations ou les séismes. Enfin, dans un monde moderne en pleine mutation, il conviendra de s'interroger sur les menaces spécifiques que fait peser le changement global sur cette montagne densément peuplée, menaces qui pourraient remettre en cause le développement économique et la qualité des conditions de vie des populations montagnardes.

Une chaîne de montagnes géodynamiquement active

L'Himalaya est le résultat de la collision des plaques Inde et Asie, qui se poursuit depuis près de cinquante millions d'années. La convergence de ces deux plaques, à un rythme de l'ordre de 5 cm/an, est un processus toujours actif, qui entraîne la déformation de la plaque indienne en grandes lames — ou nappes — de croûte continentale, progressivement mises en place du nord vers le sud, et ce depuis environ vingt millions d'années (MOLNAR & TAPPONNIER 1975, VALDIYA 1998). La superposition de ces nappes, qui s'ancrent en profondeur au

niveau d'un grand plan de décollement (le MHT, ou grand chevauchement himalayen), a conduit à un épaississement de la croûte (près de deux fois celle de la croûte indienne, avec une racine à près de 75 km de profondeur) qui, par simple effet isostatique «passif», suffirait à expliquer l'ampleur des reliefs ainsi créés (fig. 1; BOLLINGER *et al.* 2004). Néanmoins, la convergence entretenue des deux plaques et la compression qui en résulte redressent peu à peu les plans de chevauchement (DELCAILLAU 1992), créant ainsi des zones de soulèvement «actif» de l'édifice himalayen, d'autant plus important que l'on se déplace vers le nord, vers la zone la plus interne de la montagne. Cette dynamique permet d'expliquer les traits caractéristiques des reliefs himalayens, constitués d'unités de relief parallèles s'étirant sur près de 2 500 km d'est en ouest.

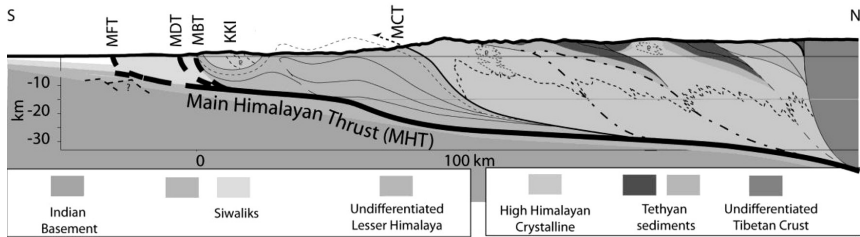


Fig. 1. — Coupe géologique de la chaîne himalayenne au niveau de Kathmandou (Népal) et ses principales unités morphostructurales: la plaine du Terai, au sud du Chevauchement Frontal Principal (MFT); les collines des Siwaliks entre le MFT et le Chevauchement Bordier Principal (MBT) avec d'autres chevauchements intermédiaires, tel le Chevauchement Principal des Duns (MDT); le Mahabharat Lekh (Bas-Himalaya), puis le Pahar sont bordés au nord par le Chevauchement Central Principal (MCT), que domine le Haut-Himalaya (d'après BOLLINGER *et al.* 2004).

L'édifice himalayen est en fait une alternance de chaînons montagneux liés aux fronts de chevauchement, séparés par des bassins intramontagnards de revers dans lesquels les dépôts piégés permettent de retracer les modalités d'évolution des formes de relief au cours des périodes récentes, en particulier sous l'influence de la tectonique et du climat (FORT 1993, 2011b). Le long de la transversale de l'Himalaya central, au Népal, se succèdent du sud vers le nord les unités suivantes: le piémont du Terai, construit depuis près de quinze millions d'années par les divagations des rivières himalayennes, puis les collines des Siwaliks ou *Churia Hills*, zone de tectonique très active, qui se soulève à un rythme moyen de 8 mm/an (fig. 2). Ces collines, longues crêtes étroites et dissymétriques (leur front raide est tourné vers le sud) séparées par des bassins allongés ou «duns», sont dominées au nord par un premier front montagneux, celui du Bas-Himalaya ou Chaîne Bordière (Mahabharat Lekh au Népal, Pir Panjal au Cachemire); limitée à la base par le Chevauchement Bordier (MBT), cette unité s'élève à plus de 3 000 m et peut même atteindre près de 5 000 m au Cachemire. Les terrains, essentiellement d'âge précambrien (plus de six cent millions d'années), sont de nature variée (calcaires, granites intrusifs notamment), avec une prédominance



Fig. 2. — Les formations molassiques des Siwaliks, anciens dépôts de piémonts aujourd'hui déformés (plongement vers le nord) par la convergence Inde-Asie et intégrés à l'édifice montagneux (© M. Fort, 1978).

de terrains schisteux dans la partie supérieure; leur faible résistance à l'érosion explique le développement, au nord de ces moyennes montagnes, d'une zone relativement déprimée ou «Pahar», très peuplée, où se succède une série de bassins de confluences fluviales (Pokhara) ou d'anciennes cuvettes lacustres perchées d'âge plio-quaternaire (Kathmandou, Cachemire). Le fond plat de ces bassins offrit aux premières sociétés de bonnes conditions de développement de la riziculture, dont l'espace est aujourd'hui concurrencé par la progression incontrôlée de l'urbanisation. Plus au nord, ces bassins sont bordés par un front montagneux vigoureux, celui du Haut-Himalaya, limité à la base par le Chevauchement Central. Cette zone de cisaillement majeur, très déformée, met en contact les schistes du Bas-Himalaya avec les unités cristallines du Haut-Himalaya, à leur tour surmontées par des formations sédimentaires plus ou moins métamorphisées au niveau de la Faille Nord-Himalayenne. L'ensemble, qui représente près de quinze kilomètres de croûte basculée vers le nord, sous-tend les sommets englacés de l'Himalaya («Demeure des neiges» en sanskrit) qui, à plusieurs reprises, dépassent l'altitude mythique de 8 000 m, avec des parois rocheuses matérialisant de façon spectaculaire l'épaississement de la bordure nord de la croûte indienne après sa collision avec l'Asie (fig. 3). Au nord de la Haute Chaîne, les altitudes décroissent relativement (6 000-6 500 m) mais les pentes, taillées dans les formations sédimentaires «tibétaines» plissées, du cambrien à l'éocène (de cinq cent quarante à cinquante millions d'années), demeurent raides

et fortement marquées par l'aridité et le froid. La population est plus clairsemée, pratiquant une activité agropastorale, faite de migrations entre le village, autour duquel se concentrent les champs irrigués, et les alpages d'altitude (ovins et yacks), tandis qu'en hiver, les hommes descendent jusque dans les plaines indiennes échanger leurs produits avec ceux de la zone tropicale.



Fig. 3. — La Haute Chaîne himalayenne et la face ouest de l'Annapurna I (8 072 m) dominant la vallée de la Kali Gandaki, qui s'écoule à 2 200 m d'altitude. On notera la forte inclinaison des structures vers le nord (gauche de la photo) et le passage progressif des terrains cristallins du Haut-Himalaya aux sédiments faiblement métamorphisés des unités « tibétaines ». La masse boisée dans le centre inférieur de la photo correspond à un mégaglisement préhistorique qui continue de bloquer durablement l'érosion régressive de la Kali Gandaki vers le nord (© M. Fort, 1978).

Les risques naturels en Himalaya

Au cours des dernières décennies, la croissance démographique et le développement des infrastructures ont accru la vulnérabilité des sociétés aux risques naturels. Plusieurs facteurs concourent à rendre cette montagne particulièrement sensible aux aléas naturels : les forts taux de surrection de la chaîne, l'activité sismique ainsi que les précipitations extrêmes de la mousson engendrent un système particulièrement actif, se traduisant par une incision rapide des rivières et une forte connectivité entre le chenal et la base des versants. Il n'est donc pas étonnant que ces conditions d'instabilité géodynamique chronique entraînent à la fois une forte mobilité des versants et le développement de crues souvent catastrophiques.

LE RISQUE SISMIQUE

L'aléa sismique fait partie intégrante de l'édification de la chaîne himalayenne et traduit la déformation inéluctable de l'écorce de la plaque indienne en réponse au rapprochement de cette dernière vers le nord (CATTIN & AVOUAC 2000). En fait, il existe une importante micro-séismicité assez largement répandue au sud de la Haute Chaîne himalayenne, mais ces petits tremblements de terre, qui ne sont pas ressentis par les hommes, n'ont pas de conséquences directes perceptibles, si ce n'est de favoriser localement la fissuration des roches et à terme de les fragiliser. En revanche, l'Himalaya peut être affecté de grands séismes très destructeurs. L'un des plus récents est celui du Cachemire (magnitude de moment $M_w = 7,6$), qui a fait près de quatre-vingt mille morts et plus de cent vingt mille blessés. D'autres grands séismes ont frappé la chaîne au cours du dernier siècle (1905: Kangra, $M_w = 7,8$, près de vingt mille morts; 1934: Bihar Népal, $M_w = 8,1$, quinze mille morts et près de quatre-vingt-dix mille sinistrés; 1950: Assam, $M_w > 8,4$, nombre exact de victimes inconnu, mais destructions sur près de 50 000 km²). Tous correspondent au jeu des chevauchements vers le sud lié à la convergence Inde-Eurasie (BILHAM 1995). Ces séismes, et d'autres de magnitude plus faible ($M_w \geq 5$), restent une menace constante pour les populations himalayennes. La distribution de la séismicité enregistrée au Népal depuis plus de vingt ans (SAPKOTA 2011) montre que les séismes sont particulièrement fréquents au sud de la Haute Chaîne (fig. 4). Dans cette zone de 100 à 150 km de large, délimitée approximativement au nord par une altitude de 3 500 m, s'accumule en profondeur un maximum de contraintes, là où le MHT se raidit et bloque, avant que l'énergie accumulée pendant deux ou trois siècles ne soit brutalement relâchée (BOLLINGER *et al.* 2004).

Or c'est dans cette zone sud-himalayenne, qui inclut les moyennes montagnes, les collines des Siwaliks et le piémont, que les densités de population sont les plus élevées (> 200 habitants/km²). Du fait de l'exode rural des dernières décennies, les villes des bassins intérieurs du Pahar (Kathmandou, Pokhara, Srinagar) et du piémont himalayen, particulièrement vulnérables, risquent de subir les plus grosses pertes matérielles et humaines. En effet, la sismologie historique et les progrès récents en géophysique ont montré que sur le front himalayen, les séismes de $M_w > 8$ avaient une probabilité d'occurrence forte sur des périodes durant de cent cinquante à deux cents ans, alternant avec des périodes de calme sismique relatif (faible sismicité) qui pouvaient durer de cinq cents à six cents ans (SAPKOTA 2011). La partie centrale de la chaîne himalayenne est l'une des zones les plus susceptibles de connaître un fort séisme au cours du siècle à venir. La menace est diffuse, mais lorsqu'elle se concrétisera, elle affectera sans discrimination zones rurales et urbanisées. C'est dans ces dernières que la situation peut devenir instantanément catastrophique, du fait des concentrations de population, de la mauvaise qualité générale des constructions, de la rupture de tous les réseaux de communication et de transport, et de l'incapacité matérielle et humaine à faire face à un afflux de blessés. La vallée de Kathmandou (> 2,5 millions d'habitants; fig. 5), qui a été fortement affectée en 1934 par le séisme du Bihar, n'est pas à

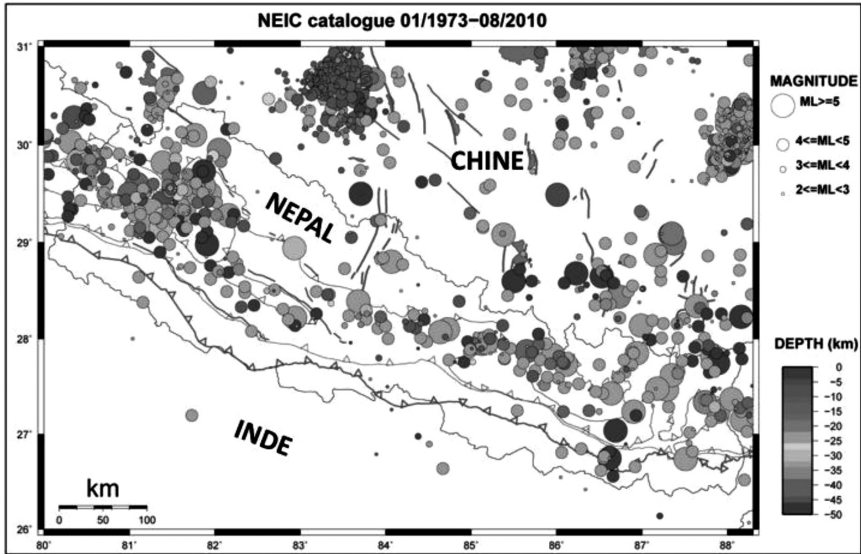


Fig. 4. — Carte de sismicité du Népal fournie par le catalogue du *National Earthquake Information Center* américain (téléséismes). On notera une concentration des séismes au nord et au-dessus des deux principaux chevauchements, bordier et central respectivement (d'après SAPKOTA 2011).

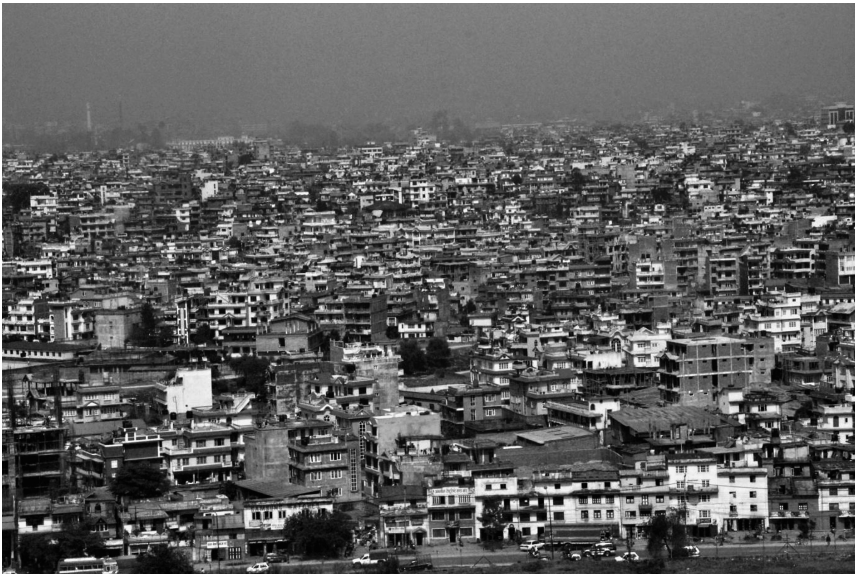


Fig. 5. — La vallée de Kathmandou (> 2,5 millions d'habitants) est sous la menace d'un séisme majeur, dont les impacts seraient aggravés par le sous-sol constitué d'anciens sédiments lacustres. L'urbanisation accélérée et anarchique de la capitale du Népal, au cours des deux dernières décennies, a considérablement accru la vulnérabilité des populations (© M. Fort, 2010).

l'abri d'un nouveau grand séisme (BILHAM & WALLACE 2005, SARKOTA 2011): celui ci sera d'autant plus destructeur que le sous-sol est constitué d'anciens sédiments lacustres, propices à l'amplification des vibrations telluriques.

LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Les mouvements de terrain sont présents dans toutes les montagnes du monde, et *a fortiori* en Himalaya. En premier lieu, les amplitudes de relief très élevées et les fortes pentes favorisent toute forme d'instabilité dès que l'on dépasse un certain angle d'équilibre ($32^\circ \pm 2^\circ$); or l'incision active des rivières en réponse à la surrection himalayenne entretient un raidissement, donc un déséquilibre permanent à la base des versants. L'autre facteur prédisposant est la nature plus ou moins résistante des terrains. Certaines roches sont massives (comme les gneiss ou les granites du Haut-Himalaya). D'autres comme les schistes, qui prédominent dans le Bas-Himalaya où l'occupation humaine est la plus dense, sont en revanche susceptibles de se gorger d'humidité, de fluer ou de glisser sur la pente, donnant lieu à des mouvements de terrain qui peuvent affecter tout ou partie d'un versant. Enfin, certains versants sont recouverts d'un épais manteau de débris hérités d'anciens glissements de terrain (fig. 6): l'hétérogénéité de tels matériaux les rend particulièrement instables et propices à des relais de processus (glissements purs, glissements par coulées, ravinements et laves torrentielles).

A plus de 90 %, les instabilités des versants himalayens sont déclenchées suite à une saturation hydrique des terrains liée aux fortes précipitations de mousson (BRUNSDEN *et al.* 1981, DAHAL & HASEGAWA 2008); au niveau du front de la Haute Chaîne, on peut même dépasser 5 000 mm/an (flanc sud des Annapurnas). La pression interstitielle de l'eau, qui occupe tous les pores du matériau, l'alourdit, augmente la composante gravitaire et provoque ainsi la rupture et la mise en mouvement de la couverture meuble du versant. Le montant de précipitation nécessaire au déclenchement du mouvement reste un sujet de discussion, car il est difficile d'isoler ce paramètre des autres facteurs favorables (exposition et valeur de la pente, nature des minéraux phylliteux, densité de fracturation des roches, ampleur et morphologie générale du versant, ...). Trois paramètres sont particulièrement importants: le seuil de précipitation, le cumul et l'historique des pluies. Lors de la séquence pluvieuse, le seuil de précipitation susceptible de déclencher des mouvements de terrain varie selon les événements observés: de 100 mm à 260 mm/24h (STARKEL 1976, FROELICH & STARKEL 1987, DAHAL *et al.* 2006). Par ailleurs et selon les mêmes auteurs, un cumul de pluie de > 350 mm en trois jours serait suffisant pour déclencher les glissements. Enfin, la combinaison de pluies journalières d'au moins 144 mm et de pluies antérieures, cumulées sur plusieurs jours voire plusieurs mois (DAHAL & HASEGAWA 2008, GABET *et al.* 2004), augmentera la pression hydrostatique des terrains jusqu'au point de rupture. Il n'est donc pas étonnant de constater que c'est surtout en fin de période de mousson, lorsque les terrains sont saturés, que se produisent préférentiellement

les mouvements de terrain (CARSON 1985), ce qui n'exclut évidemment pas l'occurrence d'événements extrêmes isolés, par exemple lors des orages printaniers.

Le deuxième facteur déclenchant est la sismicité, avec des conséquences morpho-hydrologiques qui peuvent être particulièrement dramatiques. Des centaines de glissements de terrain se sont produits à la suite des séismes du Cachemire (2005) et du Sichuan (2008), y compris sur des versants couverts de forêts, mais bien peu parmi ces glissements ont excédé un volume de 10^6 m^3 . Pourtant, des villages ont été emportés, les réseaux de communication détruits, créant une situation de désorganisation telle que l'accès aux sinistrés a été rendu très difficile. En Himalaya, les mouvements de terrain les plus volumineux ($> 10^9 \text{ m}^3$), pour la plupart d'âge préhistorique, sont de type avalanche rocheuse et ont pu être déclenchés par des tremblements de terre, comme cela a été suggéré au Népal dans le bassin de Pokhara (FORT 1987) ou sur les contreforts du Dhaulagiri (FORT 2000) ou de l'Annapurna (FORT 2011a). Même si leurs effets (blocage de vallées, réorganisation du réseau hydrographique) se font encore sentir plusieurs milliers d'années après, le rôle de ces mégaséismes destructeurs ($M_w \geq 7,5$; d'après KEEFER 1994) n'a pourtant rien de comparable en termes de fréquence avec la périodicité annuelle de la mousson, et il est de fait souvent difficile d'établir une corrélation nette entre sismicité moyenne et déclenchement de mouvements de terrain. Dans la majorité des cas ($M_w < 5$), les séismes doivent plutôt être considérés comme des facteurs préparatoires (fissuration des roches), favorisant l'infiltration des eaux et les ruptures brutales de versants lors des moussons suivantes.



Fig. 6. — Mouvement de terrain actif de Ramche (vallée de la Trisuli), affectant d'anciens dépôts de versants glissés (cf. les gros blocs qui parsèment les pentes, comme au premier plan). Ce secteur, particulièrement dynamique, menace la nouvelle route (à mi-pente du versant) destinée à développer les échanges directs entre la Chine, Kathmandou et le sud du Népal. Les longues balafres d'incision torrentielles, fonctionnelles lors de chaque mousson, causent fréquemment des interruptions de circulation de plusieurs jours (© M. Fort, 2010).

Un troisième facteur déclenchant est de plus en plus invoqué pour les zones de haute montagne. La diminution de volume des glaciers himalayens, et l'amincissement des langues en particulier, fait disparaître la fonction de « contrefort » que les glaces exerçaient à la base des versants raidis, et crée donc un relâchement des contraintes qui peut engendrer une réaction « paraglaciale ». Celle-ci se traduit par une recrudescence de vastes écroulements pouvant affecter toute une paroi de montagne (EVANS & CLAGUE 1994). Au Pakistan, près de trois cents mouvements géants ont été inventoriés, dont la cause est généralement attribuée au double effet du retrait des glaces et de la sismicité, également forte dans ce secteur de « syntaxe » himalayenne (HEWITT 2009). Enfin, la remontée de l'isotherme 0° C en altitude peut aussi provoquer la fusion du pergélisol rocheux et l'occurrence d'écroulements rocheux, comme cela a été récemment mis en évidence dans les Alpes (RAVANEL & DELINE 2010). Mais la faible occupation humaine des hautes vallées amène, de fait, à considérer les précipitations de mousson comme le facteur déclenchant des mouvements de terrain le plus dangereux.

LES RISQUES D'INONDATION

Les inondations constituent une autre menace qui pèse fortement sur les vallées himalayennes et leur piémont. Les inondations ne doivent pas être confondues avec les crues, montées saisonnières et prévisibles des eaux liées aux variations annuelles du bilan hydrologique (fonte des glaces et des neiges, pluies de mousson). Quand il y a inondation, la rivière sort de son chenal brutalement, pour occuper un espace qui d'ordinaire est hors d'eau. Plusieurs situations peuvent se présenter, selon la morphologie de la vallée et du lit de la rivière, selon l'existence ou non de glaciers en amont des vallées.

Dans les hautes vallées, le recul marqué de la plupart des glaciers (DYURGEV & MEIER 2005, BOLCH *et al.* 2011) se traduit par le développement, de plus en plus rapide, de lacs proglaciaires en arrière des moraines frontales (BAJRACHARYA & MOOL 2009). Le phénomène est particulièrement spectaculaire dans la partie orientale de l'Himalaya où les vallées intérieures, situées à plus de 4 000 m d'altitude, sont occupées par des langues glaciaires à faible pente longitudinale. Plusieurs milliers de ces lacs ont ainsi été répertoriés, et certains d'entre eux inspirent de vives inquiétudes du fait de la fragilité apparente de leur barrage morainique. Dans un passé récent, plusieurs crues catastrophiques se sont produites par rupture de ces moraines, tant sur le versant sud (zone de l'Everest, du Bhoutan, zone du Mustang) que sur le versant nord-tibétain, causant de très graves dégâts sur plusieurs dizaines de kilomètres en aval (VUICHARD & ZIMMERMANN 1987, BOLCH *et al.* 2008). La surveillance de ces lacs, qu'autorise maintenant la répétitivité des images satellitaires, permet de suivre chaque année l'augmentation de leur surface et, le cas échéant, de mettre en œuvre des mesures de drainage d'urgence pour protéger les villages situés en contrebas.

Plus en aval dans les vallées, la succession de gorges profondes alternant avec des élargissements plus ou moins marqués se traduit par des phénomènes de réactions en chaîne particulièrement dévastateurs. Une onde de crue, lorsqu'elle se propage, se traduit par une montée d'eau dans les gorges tandis qu'au niveau de chaque élargissement, la rivière «respire» et s'étale, engendrant une forte érosion des berges au détriment de secteurs de terrasses habitées ou cultivées (fig. 7). Ces excès sont très fréquemment provoqués par l'injection brutale dans le lit de la rivière de débris qui non seulement augmentent le volume du flot, mais accroissent aussi son pouvoir destructeur. Ces débris peuvent être apportés par des torrents affluents, sous forme de laves torrentielles (fig. 8), ou par des glissements de terrain qui, s'ils sont suffisamment volumineux, peuvent aller jusqu'à bloquer la vallée (fig. 9). Se forme alors un lac en amont, qui peut submerger des zones habitées (FORT *et al.* 2010, FORT & COSSART 2011). Si le barrage cède brutalement, l'onde de crue dévastatrice déferle alors sur plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres en aval de la vallée, onde qui peut à son tour déclencher de nouveaux glissements de terrain, lesquels créent de nouveaux barrages, etc. Même s'il s'agit souvent de lacs éphémères, les dégâts peuvent être importants. Le développement récent d'infrastructures routières, qui suivent de préférence les fonds de vallée, révèle souvent une méconnaissance de ce type de risque par les ingénieurs. De même, les ponts qui enjambent les affluents sont rarement calibrés pour laisser passer des laves torrentielles, d'où l'endommagement possible de telles structures, aux conséquences catastrophiques (ADHIKARY & KOSHIMIZU 2005, FORT *et al.* 2010).



Fig. 7. — Erosion de berge (> 20 m de hauteur) dans la moyenne vallée de la Kali Gandaki. Un glissement de terrain a partiellement obstrué la vallée en amont, repoussant la rivière sur la rive opposée. Plusieurs centaines d'hectares de terres ont ainsi été emportées, ainsi que quelques têtes de bétail. Quelques semaines après l'événement (septembre 1999), la rivière a réintégré son chenal principal, à droite de la photo (© M. Fort, 2000).



Fig. 8. — Lave torrentielle, déclenchée lors d'un très gros orage printanier au sud du massif du Dhaulagiri. L'abondante charge solide (plus de 50 %), constituée d'un mélange de boue, de fragments rocheux et de blocs pouvant excéder le mètre cube de volume, a été injectée dans le lit torrentiel par de nombreux petits glissements qui se sont déclenchés en amont du bassin-versant en réponse à l'intensité des précipitations (© M. Fort, 1974).

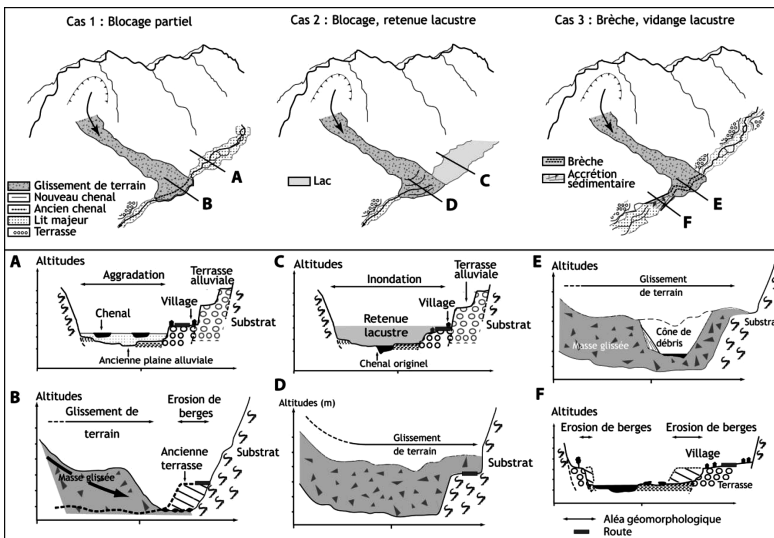


Fig. 9. — Différentes situations engendrées par l'obstruction partielle ou totale d'une vallée par un glissement de terrain. Le blocage partiel (cas 1) dévie le tracé de la rivière et provoque une érosion de la rive opposée. Le blocage total de la vallée induit la formation d'un lac en amont (cas 2) et la submersion possible du fond de vallée (y compris terrasse et village), tandis que la rupture du barrage (cas 3) peut entraîner un lâcher d'eau brutal en aval, des sapements latéraux et donc la disparition par érosion de terrasses de culture, voire d'habitations (d'après FORT & COSSART 2011).

Enfin, au débouché du piémont himalayen, les rivières ont construit des mégacônes; elles ne sont plus confinées et peuvent brutalement changer de tracé selon un processus appelé «avulsion». En 1993, la Bagmati (rivière qui draine le bassin de Kathmandou) a causé des inondations catastrophiques, faisant plus de mille victimes dans le piémont du Terai: en quelques jours, le débit de la rivière est passé de 16 à 11 700 m³/s, détruisant sur son passage plusieurs villages et un barrage destiné à l'irrigation (FORT 1997). En août 2008, l'un des plus gros affluents du Gange, la Sapt Kosi, qui draine tout l'est du Népal (flanc sud et ouest du massif de l'Everest; bassin-versant de près de 60 000 km²), est sorti de son lit à l'apex de son cône, s'ouvrant un nouveau chenal quelque 60 km à l'est du précédent, balayant sur plus de 2 000 km² zones habitées et cultivées en faisant plus de deux mille victimes (CHAKRABORTY *et al.* 2010). Cet événement, qui semble avoir surpris les gestionnaires, n'est en fait qu'un instantané des processus d'inondation et de divagation des rivières himalayennes qui, depuis plus de dix-huit millions d'années, se sont répétés à de multiples reprises pour façonner le piémont himalayen avant que ces dépôts (molasses) ne soient à leur tour déformés par les forces de convergence entre Inde et Asie et progressivement incorporés à l'édifice montagneux.

Quelles perspectives pour l'avenir?

Les dynamiques géomorphologiques sont omniprésentes dans la montagne himalayenne. Les populations montagnardes l'ont souvent appris à leurs dépens: glissements de terrain, crues torrentielles, avalanches, séismes, ces phénomènes sont souvent connus, sinon compris, donnant souvent lieu à des explications surnaturelles. Au Népal, on constate depuis plusieurs décennies une évolution faite de paradoxes. L'accès à l'éducation éloigne progressivement les jeunes montagnards du mode de vie pénible de leurs parents, harassés par la mise en culture de champs en terrasses sur des pentes vertigineuses (fig. 10). Faute de maintenance, les terrasses s'écroulent, et l'on constate une recrudescence de l'érosion sur ces pentes laissées à l'abandon (KHANAL & WATANABE 2006). Les jeunes éduqués peuplent désormais les villes dont l'emprise ne cesse d'augmenter au détriment des périmètres cultivés. Par contraste, l'aspiration au développement et le souci de désenclaver les vallées intérieures amènent de plus en plus les communautés villageoises à construire des routes carrossables qui les relient aux grands axes asphaltés et permettent l'intensification des échanges entre centres urbains et ruraux, qui à leur tour se transforment progressivement en petits centres urbains ou *bazaar*. Ces nouvelles dynamiques territoriales peuvent cependant à tout moment être remises en cause par les interruptions de trafic ou de réseau liées à des catastrophes qui ne sont donc plus uniquement naturelles. En effet, les nouvelles concentrations de population dans des zones potentiellement à risque augmentent considérablement la vulnérabilité générale, ce d'autant plus que les autorités responsables ne sont ni préparées ni en mesure de gérer des situations de crise.



Fig. 10. — Versant entièrement façonné en terrasse de cultures, flanc nord du Shivapuri Lekh (nord du bassin de Kathmandou). Les seuls bosquets de forêt correspondent à des bois sacrés (© M. Fort, 1979).

Outre ces phénomènes de déprise rurale et de néo-urbanisation incontrôlée, plusieurs sources d'inquiétude viennent assombrir le futur: la crainte des bouleversements engendrés par le changement climatique sur les risques naturels mais surtout sur la ressource en eau et, par voie de conséquence, sur la sécurité alimentaire de plus d'un milliard d'hommes qui, grâce aux eaux himalayennes, peuvent accroître leur production agricole par des périmètres irrigués. Nous avons déjà évoqué plus haut le risque de rupture de lacs glaciaires, directement lié à la fonte accélérée des glaces himalayennes. Un paragraphe contenu dans le quatrième rapport du GIEC, ou Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (CRUZ *et al.* 2007), a malencontreusement suggéré que l'Himalaya serait complètement déglacé vers 2035 et que l'eau viendrait à manquer dans les rivières (COGLEY *et al.* 2010). Certes, le GIEC a depuis démenti l'information, mais il n'en reste pas moins que la question se pose des variations du débit des rivières himalayennes au cours des prochaines décennies. De nombreuses études semblent montrer que les eaux issues de la fonte des glaciers ne représentent en fait qu'une faible part

du débit des rivières, de l'ordre de 4-10 %, alors que ce sont les pluies de mousson qui assurent l'essentiel (deux tiers) de ce débit (ALFORD & ARMSTRONG 2010, THAYYEN & GERGAN 2010). Les apports de la fusion nivale printanière représenteraient quant à eux un tiers du débit (BOOKHAGEN & BURBANK 2010). Ces données s'appuient sur les modèles climatiques existants et sur l'évaluation de l'extension et du volume du couvert neigeux et/ou des glaces à partir d'analyses d'images satellitaires, auxquelles sont appliquées des fonctions de transfert pour en déduire le débit des rivières (BOLCH *et al.* 2012). Les résultats de ces études sont loin d'être toujours convergents, leur marge d'incertitude reste importante, et la saisonnalité tout comme la position géographique au sein de la chaîne ne sont pas toujours bien prises en compte pour chacune des régions considérées. De forts contrastes existent entre l'est, où la mousson est très abondante, et l'ouest de l'Himalaya, qui reçoit davantage de précipitations hivernales. Actuellement, et si l'on fait abstraction des fortes pertes par évaporation, les eaux de fonte glaciaire et nivale contribuent majoritairement au débit de l'Indus. Pour le Brahmapoutre en revanche, elles ne représenteraient plus que 27 % (IMMERZEEL *et al.* 2010). Les simulations faites selon différents scénarii climatiques montrent que la baisse de la contribution des eaux glacio-nivales serait partiellement compensée par une élévation des précipitations, même si les auteurs de telles études reconnaissent qu'il est très difficile de simuler le montant moyen des précipitations de mousson et leur variabilité interannuelle (IMMERZEEL *et al.* 2010). En particulier dans le Brahmapoutre inférieur, l'évolution risque d'aller vers un renforcement des valeurs d'étiage pendant la saison sèche, et des pics de crue et de la fréquence des inondations pendant la mousson (GAIN *et al.* 2011). Dans tous les cas, et malgré le degré d'incertitude sur l'avenir, les autorités publiques devraient dès maintenant prendre les mesures nécessaires pour parer à une augmentation des situations extrêmes (déficit d'eau accru en saison sèche, intensification des précipitations en période de mousson) qui, compte tenu de l'évolution démographique et indépendamment de l'évolution climatique réelle, ne pourra aller qu'en s'aggravant et peser sur la qualité de vie de plus d'un sixième de la population mondiale.

Conclusions

Archétype d'une chaîne de collision intracontinentale, l'Himalaya est aussi le château d'eau de l'Asie. Si la tectonique est à l'origine de la création de ses reliefs vigoureux, c'est l'interaction de celle-ci avec les composantes de l'érosion (précipitations de mousson, action des glaciers quaternaires, incision fluviale) qui donne à cette chaîne de montagnes tout son caractère: pentes vertigineuses, contrastes entre gorges profondes et bassins perchés, risques naturels récurrents (séismes, glissements de terrain, inondations) dont la magnitude peut atteindre des niveaux exceptionnels. L'Himalaya, au contact des

hautes terres centre-asiatiques et de l'Inde tropicale, fut de tout temps parcouru par des populations à la recherche de complémentarités de ressources entre ces milieux si différents, et aujourd'hui par des touristes et alpinistes attirés par les plus hauts sommets de la planète. La démographie et le développement économique des régions himalayennes, la construction de routes et le développement de villes de plus en plus denses, rendent les menaces liées à la sismicité et au changement climatique plus prégnantes que jamais. Même si les modèles actuels proposent des scénarii où les marges d'erreur restent non négligeables, il apparaît acquis que l'accès à la ressource en eau deviendra dans ces régions le problème majeur des années à venir et que, de façon plus difficilement prévisible, le flanc sud himalayen risque d'être à nouveau affecté par d'autres grands séismes très destructeurs. La montagne himalayenne est un organisme vivant, animé par des forces constructrices et destructrices; pour des générations d'hommes et de femmes qui vivent sur ses flancs, qui la vénèrent et la redoutent tout à la fois, la «Demeure des neiges» reste à jamais une source d'inspiration et une mère nourricière.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Laurent Bollinger (CEA-DASE, Bruyères-le-Châtel) et à Soma Nath Sapkota (directeur *National Seismological Centre*, Népal, Kathmandou), qui m'ont communiqué des documents personnels et m'ont donné l'autorisation de les reproduire. Tout au long de mes longues missions, Man Bahadur Mangar fut un compagnon indéfectible sans lequel je n'aurais jamais pu mener à bien mes recherches. Tous mes remerciements vont aux membres de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, en particulier à Mme Danielle Swinne, sa secrétaire perpétuelle, et à M. André Ozer, pour leur aimable invitation.

BIBLIOGRAPHIE

- ADHIKARY, D. P. & KOSHIMIZU, S. 2005. Debris flow disaster at Larcha, upper Bhotekoshi valley, Central Nepal. — *The Island Arc*, **14**: 410-423.
- ALFORD, D. & ARMSTRONG, R. 2010. The role of glaciers in stream flow from the Nepal Himalaya. — *The Cryosphere Discussion*, **4**: 469-494.
- BAJRACHARYA, S. & MOOL, P. 2009. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. — *Annals of Glaciology*, **50** (53): 81-86.
- BILHAM, R. 1995. Location and magnitude of the 1833 Nepal Earthquake and its relation to the rupture zones of contiguous great Himalayan earthquakes. — *Current Science*, **69**: 101-128.
- BILHAM, R. & WALLACE, K. 2005. Future Mw > 8 earthquakes in the Himalaya: Implications from the 26 Dec. 2004 Mw = 9.0 earthquake on India's eastern plate margin. — *Geol. Surv. India Spec. Publ.*, **85**: 1-14.
- BOLCH, T., PIECZONKA, T., & BENN, D. I. 2011. Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. — *The Cryosphere*, **5**: 349-358.

- BOLCH, T., BUCHROITHNER, M. F., PETERS, J., BAESSLER, M. & BAJRACHARYA, S. 2008. Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest région/Nepal using spaceborne imagery. — *Natural Hazards Earth System SCIENCES*, **8**: 1329-1340.
- BOLCH, T., KULKARNI, A., KAAB, A., HUGGEL, C., PAUL, F., COGLEY, J. G., FREY, H., KARGEL, J. S., FUJITA, K., SCHEEL, M., BAJRACHARYA, S. & STOFFEL, M. 2012. The State and Fate of Himalayan Glaciers. — *Science*, **336**: 310-314.
- BOLLINGER, L., AVOUAC, J.-P., CATTIN, R. & PANDEY, M. R. 2004. Stress build-up in the Himalaya. — *Journal of Geophysical Research*, **109** (B11405, doi: 10.1029/2003JB002911).
- BOOKHAGEN, B. & BURBANK, D. W. 2010. Towards a complete Himalayan hydrological budget: The spatiotemporal distribution of snowmelt and rainfall and their impact on river discharge. — *Journal of Geophysical Research*, **115** (FO3019, doi:10.1029/2009JF001426, 2010).
- BRUNSDEN, D., JONES, D. K. G., DOORNKAMP, J. C. & MARTIN, R. P. 1981. The geomorphological character of part of the Low Himalaya of Eastern Nepal. — *Zeitschrift für Geomorphologie*, **37** (Supplementband N. F.): 25-72.
- CARSON, B. 1985. Erosion and sedimentation processes in the Nepal Himalaya. — Kathmandu (Nepal), ICIMOD Occasional Paper n° 1, 39 pp.
- CATTIN, T. & AVOUAC, J. P. 2000. Modeling mountain building and the seismic cycle in the Himalaya of Nepal. — *Journal of Geophysical Research*, **105**: 13389-13407.
- CHAKRABORTY, T., KAR, R., GHOSH, P. & BASU, S. 2010. Kosi megafan: Historical records, geomorphology and the recent avulsion of the Kosi River. — *Quaternary International*, **227** (2): 143-160.
- COGLEY, J. G., KARGEL, J. S., KASER, G. & VAN DER VEEN, C. J. 2010. Tracking the source of glacier misinformation. — *Science*, **327**: 522.
- CRUZ, R. V., HARASAWA, H., LAL, M., WU, S., ANOKHIN, Y., PUNSALMAA, B., HONDA, Y., JAFARI, M., LI, C. & HUU NINH, N. 2007. Asia. — In: PARRY, M. L., CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., VAN DER LINDEN, P. J. & HANSON, C. E. (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, pp. 469-506.
- DAHAL, R. K. & HASEGAWA, S. 2008. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. — *Geomorphology*, **100**: 429-443.
- DAHAL, R. K., HASEGAWA, S., YAMANAKA, M., BHANDARY, N. P. & YATABE, R. 2006. Role of monsoon rainfall on landsliding in Nepal. — In: *Proc. Intern. Symposium on Landslide Hazards in Orogenic Zone from the Himalaya to Island Arc in Asia*, 1-4: 111-118.
- DELCAILLAU, B. 1992. Les Siwaliks de l'Himalaya du Népal oriental. — CNRS, Mémoires et Documents de Géographie, 205 pp.
- DYURGEROV, M. & MEIER, M. F. 2005. Glaciers and the changing earth system. A 2004 snapshot. — Boulder (Co), University of Colorado, Arctic and Alpine Research, Occasional Paper 58, 118 pp.
- EVANS, S. G. & CLAGUE, J. J. 1994. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. — *Geomorphology*, **10**: 107-128.
- FORT, M. 1987. Sporadic morphogenesis in a continental subduction setting: An example from the Annapurna Range, Nepal Himalaya. — *Zeitschrift für Geomorphologie*, **63** (Supplementband N. F.): 9-36.

- FORT, M. 1993. Géomorphologie d'une chaîne de collision intra-continentale: l'Himalaya Central, transversale des Annapurnas. — Thèse d'Etat, Université Paris 7, 702 pp. + 2 cartes hors-texte.
- FORT, M. 1997. Développement et aléas naturels en Himalaya du Népal: la crue de juillet 1993, bassin versant de la Bagmati. — *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, **3** (1): 43-58.
- FORT, M. 2000. Glaciers and mass wasting processes: Their influence on the shaping of the Kali Gandaki valley (Higher Himalaya of Nepal). — *Quaternary International*, **65/66**: 101-119.
- FORT, M. 2011a. Two large late Quaternary rock slope failures and their geomorphic significance, Annapurna Himalayas (Nepal). — *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, **34** (1): 5-16.
- FORT, M. 2011b. The Himalayas: From mountain building to landform evolution in a changing world. — *Geographia Polonica*, **84** (2): 15-37.
- FORT, M. & COSSART, E. 2011. Aléas naturels et menaces sur les axes de communication en Himalaya du Népal: la vallée de la moyenne Kali Gandaki. — *Bull. de l'Assoc. de Géographes Français*, **1**: 35-45.
- FORT, M., COSSART, E. & ARNAUD-FASSETTA, G. 2010. Hillslope-channel coupling in the Nepal Himalayas and threat to man-made structures: The middle Kali Gandaki valley. — *Geomorphology*, **124** (3-4): 178-199.
- FROELICH, W. & STARKEL, L. 1987. Normal and extreme monsoon rains – their role in the shaping of the Darjeeling Himalaya. — *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, **21**: 129-160.
- GABET, E. J., BURBANK, D. W., PUTKONEN, J. K., PRATT-SITLAULA, B. A. & OJHA, T. 2004. Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal. — *Geomorphology*, **63** (3-4): 131-143.
- GAIN, A. K., IMMERZEEL, W. W., SPERNA WEILAND, F. C. & BIERKENS, M. F. P. 2011. Impact of climate change on the Stream flow of the lower Brahmaputra: Trends in high and low flows based on discharge-weighted ensemble modelling. — *Hydrological Earth System Science*, **15**: 1537-1545.
- HEWITT, K. 2009. Catastrophic rock slope failures and late Quaternary developments in the Nanga Parbat-Haramosh Massif, Upper Indus basin, northern Pakistan. — *Quaternary Science Reviews*, **28**: 1055-1069.
- IMMERZEEL, W. W., VAN BEEK, L. P. H. & BIERKENS, M. F. P. 2010. Climate change will affect the Asian water towers. — *Science*, **328**: 1382-1385.
- KEEFER, D. K. 1994. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. — *Geomorphology*, **10**: 265-284.
- KHANAL, N. R. & WATANABE, T. 2006. Abandonment of Agricultural Land and its Consequences: A Case Study in the Sikles Area, Gandaki Basin, Nepal Himalaya. — *Mountain Research and Development*, **26** (1): 32-40.
- MOLNAR, P. & TAPPONNIER, P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. — *Science*, **189**: 419-426.
- RAVANEL, L. & DELINE, P. 2010. Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the *Aiguilles de Chamonix* (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. — *The Holocene*, **21** (2): 357-365.
- SAPKOTA, S. N. 2011. Rupture de surface du séisme de Bihar-Népal 1934: implications pour l'aléa sismique en Himalaya du Népal. — Université Paris-Diderot, Institut de Physique du Globe de Paris, Thèse de Doctorat, 291 pp.

- STARKEL, L. 1976. The role of extreme (catastrophic) meteorological events in the contemporary evolution of slopes. — *In*: DERBYSHIRE, E. (Ed.), *Geomorphology and climate*. Chichester, J. Wiley, pp. 203-241.
- THAYYEN, R. J. & GERGAN, J. T. 2010. Role of glaciers in watershed hydrology: “Himalayan catchment” perspective. — *The Cryosphere*, **4** (1): 115-128.
- VALDIYA, K. S. 1998. *Dynamic Himalaya*. — India, University Press (Hyderabad), 178 pp.
- VUICHARD, D. & ZIMMERMANN, M. 1987. The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal. Causes and consequences. — *Mountain Research and Development*, **7** (2): 91-110.